Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 15, No. 5, Dec- Jan 2020, p. 623-634

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 15، شماره 5، آذر- دی 1398، ص. 634-623

توسعه، آزمون و ارزیابی خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم به‌منظور تعیین مشخصه‌های عملکردی بهینه آن در خشک‌کردن موز

پرویز احمدی قشلاق[1]- سیدصادق سیدلو هریس[2]*- حبیبه نعلبندی[3]

تاریخ دریافت: 1397/08/08
تاریخ پذیرش: 1398/02/18

چکیده

استفاده از امواج مادون قرمز برای خشک‌کردن محصولات کشاورزی و غذایی موجب کاهش مصرف انرژی و مدت زمان خشک‌کردن و افزایش کیفیت محصول نهایی می‌گردد. در این تحقیق مراحل تغییر خشک‌کن مادون‌قرمز منفرد موجود، به دستگاه ترکیبی مادون‌قرمز- هوای گرم انجام و دستگاه مذکور ساخته شد. سپس برای ارزیابی سیستم در خشک‌کردن موز و بر اساس مبانی علمی موجود و نیز نیاز بازار مصرف، تاثیر مشخصه‌هایی مانند ضخامت ورقه‌های موز (4 و 6 میلی‌متر) و دمای سطح محصول (55، 65 و 75 درجه سانتی‌گراد) روی سینتیک خشک‌شدن و خواص کیفی محصول نهایی مطالعه شد. هم‌چنین جهت سهولت استفاده از نتایج آزمون‌ها، مدل‌های ریاضی مختلف روی داده‌های آزمایش برازش و مناسب‌ترین مدل توسعه داده شد. بر اساس نتایج حاصله، افزایش دما از 55 به 75 درجه سانتی‌گراد و نیز کاهش ضخامت نمونه‌ها تاثیر معنی‌داری روی تغییرات رنگ نمونه‌ها و زمان خشک شدن داشت ولی اثر فاکتورهای مذکور روی دانسیته نمونه‌ها غیرمعنی‌دار بود. به عبارت دیگر استفاده از دمای 55 درجه سانتی‌گراد موجب تولید بهترین محصول خشک از نظر کیفیت ظاهری شد. با توجه به خصوصیات کیفی مناسب استحصالی و مقایسه آن با داده‌های مرتبط با روش خشک‌کردن هوای گرم مشاهده شد که روش ترکیبی از دیدگاه تغییرات کیفی و زمان خشک شدن از ارجحیت برخوردار است. مقایسه مدل‌های ریاضی نشان داد که مدل پیج انتخاب مناسبی برای پیش‌بینی سینتیک خشک‌شدن موز تحت شرایط مورد مطالعه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: مدل ریاضی، موز، خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم، خواص کیفی.

مقدمه

در کلیه واحدهای صنعتی مرتبط با صنایع غذایی، خشک‌کردن یکی از فرآیندهای مهم محسوب می‌شود، زیرا در اکثر مراحل تولید مواد غذایی، حداقل یک مرحله خشک‌کردن به چشم می‌خورد. خشک‌کردن به فرآیند کاهش رطوبت مواد تا رسیدن به یک محصول خشک اطلاق می‌شود که به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. خشک‌کردن مواد با استفاده از منابع گرمایی مهم ترین و متداول‌ترین روش خشک‌کردن می‌باشد (امیرنجات، 1389). در فرآیند خشک‌کردن هدف اصلی استفاده از حداقل انرژی حرارتی برای خارج ساختن حداکثر مقدار رطوبت با در نظرگرفتن کیفیت نهایی محصول است. بر این اساس روش‌های مختلفی برای خشک‌کردن ابداع و معرفی شدند که از آن جمله می‌توان به خشک‌کردن مواد با استفاده از امواج مادون قرمز اشاره کرد.

امواج مادون قرمز ساطع شده از هر منبع، حامل انرژی است که بدون نیاز به واسط، از منبع به جسم منتقل می‌شود و سپس موجب ارتعاش مولکول‌های ماده غذایی و در نتیجه گرم‌شدن آنها می‌گردد. امواج مادون قرمز دارای ویژگی‌هایی است که استفاده از آن در خشک کردن محصولات کشاورزی، موجب کاهش مصرف انرژی، کاهش مدت‌زمان خشک‌شدن و افزایش کیفیت محصول نهایی می‌شود (Panand and Atungulu, 2011 Khampakool, *et al*., 2019). به همین دلیل استفاده از آن در سال‌های اخیر با پیشرفت در نوع منابع مادون قرمز رو به افزایش است. در خشک‌کردن به روش ترکیبی مادون قرمز– هوای گرم انتقال گرما به‌طور توام، از طریق جریان هوای گرم و تابش امواج مادون قرمز صورت می‌گیرد. بدین صورت که خشک‌کن‌های ترکیبی مادون قرمز– هوای گرم محاسن هر دو روش منفرد را داشته و معمولا موجب کاهش زمان خشک‌شدن و افزایش کیفیت محصول نهایی می‌گردد (امیر نجات، 1389).

با ابداع هر روش جدید می‌بایست تاثیر آن روی فرآیند خشک‌کردن محصولات مختلف مورد مطالعه قرار گیرد. زیرا هر محصول خصوصیات و ویژگی‌های منحصر به خود را داشته و تغییرات کیفی متفاوتی از خود نشان می‌دهد. بنابراین مطالعات جامعی باید در شرایط مختلف خشک

1- کارشناس ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی، دانشگاه فنی حرفه ای شهید بهشتی ارومیه
2 و 3- به‌ترتیب دانشیار و استادیار، مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشگاه تبریز.
(*- نویسنده مسئول: Email: ss_seiedlo@yahoo.com)
DOI: 10.22067/ifstrj.v16i1.76330

کردن روی محصول انجام گیرد و تاثیر مشخصه‌های عملکردی دستگاه روی زمان و آهنگ خشک‌شدن، خصوصیات کیفی مختلف محصول مانند دانسیته، رنگ و خصوصیات جذب مجدد محصول مورد بررسی قرار گیرد. به‌ویژه اینکه رنگ محصول خشک‌شده، مهمترین شاخص کیفی از دیدگاه مصرف‌کننده بوده و تاثیر مستقیمی روی بازاریابی و مشتری‌پسندی محصول مورد نظر دارد. در این میان مطالعه سینتیک خشک‌کردن محصول و نیز مدل‌سازی آن از دیدگاه کنترل و کاربرد خشک‌کن نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا زمان خشک‌کردن ارتباط مستقیمی با مشخصه های عملکردی سیستم دارد. بنابراین با مدل‌سازی ریاضی فرآیند خشک‌کردن می‌توان زمان خاتمه عملیات را تخمین زده و ضمن جلوگیری از مصرف زیاد انرژی، از افت کیفی محصول به دلیل خشک‌شدن طولانی مدت و افزایش دمای سطح ماده جلوگیری نمود. در نهایت مدل‌سازی سینتیک به اتوماسیون سیستم خشک‌کن کمک کرده و لازم و ضروری است.

به‌طورکلی از سه نوع مدل جهت توصیف خشک‌کردن محصولات کشاورزی استفاده می‌شود که عبارت از مدل‌های تئوری، نیمه تئوری و تجربی می‌باشند. مدل‌های تئوری خصوصیات خشک‌شدن و کاربردپذیری آن را در شرایط مختلف توصیف می‌کند اما برخی فرضیات مسئله از قبیل شکل هندسی محصول، ضریب نفوذ رطوبت و ضریب هدایت حرارتی منجر به بروز برخی خطاها در پیش‌بینی فرآیند خشک شدن می‌شود (Doymaz, 2007). مدل تجربی از اصول نظری خشک‌کردن صرف نظر کرده و یک تجزیه و تحلیل رگرسیونی بین میانگین محتوی رطوبت و زمان خشک‌شدن محصول ارایه می‌کند. روش نیمه تئوری حد واسطی از روش‌های تجربی و تئوری است (Yaldiz *et al*., 2001). مدل‌های نیمه تئوری بر اساس قانون دوم فیک استوار هستند و مدل‌ها بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی، گسترش می‌یابند (Doymaz, 2007). برای انتخاب یک مدل ریاضی مناسب که بتوان بر اساس آن سینتیک خشک‌شدن محصول هدف را توصیف کرد باید آزمایش‌های مختلفی در سطوح مختلف تیمارهای موثر بر فرآیند خشک‌کردن انجام گیرد.

در این خصوص محققین مختلفی به مدل‌سازی فرآیند خشک‌کردن محصولات کشاورزی با استفاده از خشک کن های مختلف پرداخته و مدل‌های ریاضی مختلفی نیز برای توصیف فرآیند ارایه کرده‌اند (موسوی بایگی و همکاران، 1395؛ حسینی قابوس و همکاران، 1395؛ Hebbar *et al*., 2004؛ Sharma, *et al*., 2005؛ Hakan and Can., 2006).

در تحقیق حاضر از میوه موز برای ارزیابی خشک کن ترکیبی توسعه داده شده استفاده شده است. موز نیز همانند همه محصولات کشاورزی از عمر انبارمانی کوتاهی برخوردار است که خشک‌کردن این محصول می‌تواند از ضایعات آن جلوگیری نموده و در نهایت منجر به تولید محصولی با ارزش افزوده بالا گردد. با اینکه تغییر رنگ موز حین فرآیند خشک‌کردن یک عامل محدودکننده در انتخاب روش خشک‌کردن است، با این وجود دست‌یابی به محصول با کیفیت بالا نیازمند یافتن بهترین ترکیب دمای منبع مادون قرمز، سرعت و دمای هوای گرم همرفتی در خشک کن های ترکیبی مادون قرمز– هوای گرم است تا ضمن حفظ کیفیت محصول، فرآیند با بازده بالا انجام شود. بنابراین در این تحقیق هدف اصلی، طراحی و ساخت خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم بود به‌طوریکه برای ارزیابی عملکرد خشک کن ساخته شده، فرآیند خشک‌کردن موز مورد مطالعه قرار گرفت تا تاثیر شرایط خشک‌کردن بر روی زمان خشک‌شدن و خواص کیفی محصول نهایی مانند رنگ و دانسیته محصول مشخص گردد. هم چنین هدف بعدی تحقیق، مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن موز با استفاده از خشک‌کن ترکیبی بود که این امر برای ایجاد تسهیل در امر کنترل و کاربرد خشک‌کن بود.

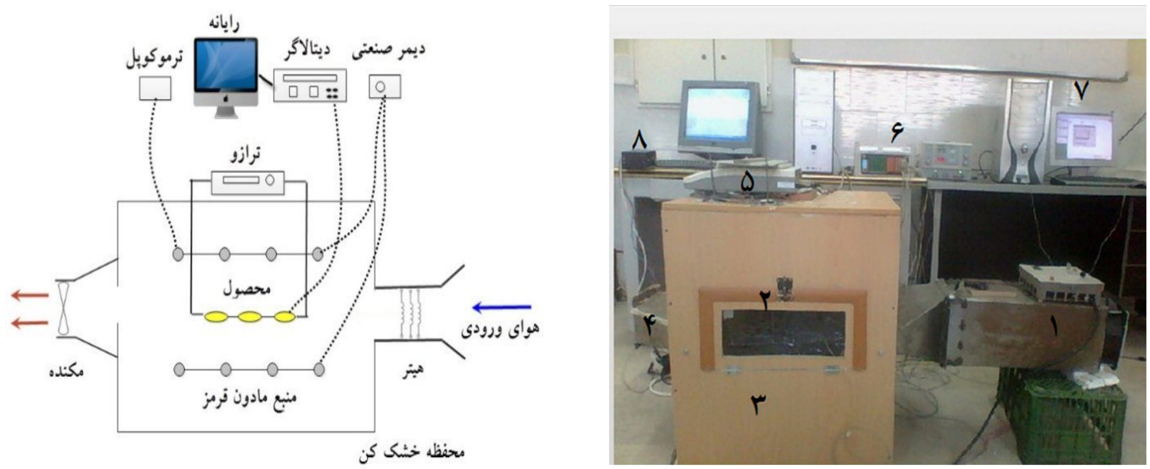
مواد و روش‌ها

خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم

برای انجام آزمایش‌ها، خشک‌کنی به صورت ترکیب مادون قرمز- هوای گرم ساخته شد (شکل 1). بدنه خشک‌کن از عایق مناسب به ضخامت 1/5 سانتی‌متر و به ابعاد 55× 60× 76 (طول، عرض و ارتفاع) سانتی‌متر ساخته شد و دیواره‌های داخلی دارای پوششی از ورق آلومینیومی شفاف بود که دارای بیشترین ضریب انعکاس در طول موج‌های بیش از 1/5 میکرومتر می‌باشد (شکل 1). برای تامین جریان هوای گرم در داخل دستگاه خشک‌کن، یک کانال به ابعاد 50× 20× 20 سانتی‌متر از آهن گالوانیزه ساخته شده و به بدنه اصلی خشک‌کن نصب گردید. در قسمت ورودی این کانال یک دمنده با توان 45 وات و 0/2 آمپر و در قسمت داخلی آن یک هیتر جهت گرم‌کردن هوای ورودی نصب گردید تا دما و سرعت هوای ورودی به خشک‌کن قابل تنظیم باشد. در دیواره کناری خشک‌کن دریچه‌ای برای خروج هوا تعبیه شد تا با خروج هوای داخل خشک‌کن، از افزایش رطوبت نسبی در محیط اطراف محصول جلوگیری شود. منبع امواج مادون قرمز رادیاتورهای لوله کوارتز با المنت داخلی تنگستن بود. توان مصرفی هر یک از این رادیاتورها 500 وات و طول و قطر آن‌ها به‌ترتیب 250 و 12 میلی‌متر بودند. این رادیاتورها روی شاسی مخصوص خود در بالا و پایین سینی محصول و در داخل خشک‌کن نصب شدند تا امواج مادون قرمز از بالا و پایین روی محصول تابیده شود. ارتفاع عمودی رادیاتورها از محصول و نیز فاصله افقی رادیاتورها از یکدیگر قابل تنظیم بود. فاصله عمودی رادیاتورها از سطح محصول 30 سانتی‌متر و فاصله افقی رادیاتورها به اندازه 5 سانتی‌متر مورد استفاده قرار گرفت زیرا در این فواصل، تابش امواج مادون قرمز در خشک‌کن ترکیبی مذکور و بر روی سینی حاوی محصول یکنواخت بود (بداقی، 1392). برای اندازه‌گیری دمای رادیاتورهای مادون قرمز از یک ترموکوپل نوع K با اتصال موقت

و دستی آنها روی بدنه رادیاتورها و در فواصل زمانی مختلف استفاده شد و با استفاده از یک دستگاه دیمر صنعتی، ولتاژ ورودی به رادیاتورها جهت حصول دمای مورد نظر کنترل شد. هم‌چنین تغییر دمای رادیاتورهای مادون قرمز توسط دیمر مربوطه صورت گرفت تا دمای حداکثر مذکور روی محصول قابل حصول باشد. کنترل دمای سطح محصول توسط دیتالاگر مجهز به ترموکوپل‌های نوع k صورت پذیرفت. هم‌چنین سینی حاوی محصول توسط چهار عدد میله فلزی به ترازوی دقیق نوع A&D مدل EK-3000i با دقت 0/01 گرم متصل شد (شکل 1) و امکان توزین و محاسبه کاهش جرم به صورت تابعی از زمان خشک شدن فراهم شد.

(الف) (ب)



شکل 1- الف: خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم شامل 1- مجموعه دمنده و هیتر 2- درب خشک‌کن 3- بدنه خشک‌کن 4- دریچه خروجی هوا 5- ترازوی دیجیتال 6- دیتالاگر 7- رایانه 8- دیمر؛ ب: شکل شماتیک خشک‌کن

آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های موز روزانه از بازار محلی خریداری و تا زمان شروع آزمایش‌ها در دمای 13 درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. نمونه‌ها پس از برش به صورت ورقه‌های نازک به ضخامت‌های 4 و 6 میلی‌متری، در آب گرم با دمای 88 درجه سانتی‌گراد به مدت 3 دقیقه بلانچ و سپس به مدت یک دقیقه در محلول 0/1 درصد اسید سیتریک غوطه‌ور شدند و در نهایت با استفاده از کاغذ صافی رطوبت سطحی نمونه‌ها گرفته شد (زیرجانی و توکلی‌پور، 1389). این پیش‌تیمار برای کاهش تغییرات رنگ محصول حین خشک‌شدن انجام شد. محتوی رطوبت اولیه نمونه‌های موز بر اساس استاندارد AOAC در آون با دمای 2± 105 درجه سانتی‌گراد به مدت 24 ساعت اندازه‌گیری شد (AOAC, 1990).

آزمون خشک شدن موز

برای انجام آزمایش‌های خشک‌کردن، ابتدا دمای هوای گرم مورد استفاده با استفاده از دیمر مربوطه در حدود 55 درجه سانتی‌گراد با دقت 1± درجه سانتی‌گراد تنظیم و سرعت جریان هوای گرم با استفاده از سرعت سنج پره‌ای در حدود 0/7 متر بر ثانیه تنظیم شد. با تغییر ولتاژ ورودی به رادیاتورها، دمای رادیاتورها به نحوی تغییر داده شد تا دماهای 50، 65 و 75 درجه سانتی‌گراد روی سینی محصول حاصل شود. بدیهی است دمای سطح محصول به دلیل گرمای نهان تبخیر در طول فرآیند، از مقادیر اولیه تا حداکثر مقدار آن یعنی 55، 65 و 75 درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یافت. دمای سطح محصول به وسیله چند ترموکوپل که روی سطح محصول قرار می‌گرفتند اندازه‌گیری شد که نمونه‌ای از نمودارهای تغییرات دمای سطح محصول تابعی از زمان خشک‌شدن در قسمت نتایج آورده شده است. آزمایش‌ها به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی انجام شدند که فاکتور اول عبارت از دمای سطح محصول در سه سطح (50، 65 و 75 درجه سانتی‌گراد) و فاکتور دوم عبارت از ضخامت ورقه‌های موز در دو سطح (4 و 6 میلی‌متری) بود. کلیه آزمایش‌ها در سه تکرار انجام شدند. پس از اعمال تنظیمات مورد نظر روی خشک‌کن در هر آزمایش، 100 گرم نمونه آماده شده به صورت لایه نازک روی دو سینی توری در داخل خشک‌کن قرار داده شدند. یکی از سینی‌ها به ترازو دیجیتالی متصل بود که این ترازو در فواصل زمانی 5 دقیقه، از طریق یک اتصال RS232 به یک واحد کامپیوتر، اقدام به داده‌برداری از جرم نمونه‌های در حال خشک‌شدن می‌کرد. سینی دوم در امتداد سینی اول قرار داشت ولی به ترازو متصل نبود. از نمونه‌های روی سینی دوم در رطوبت‌های مختلف

شامل 2، 1، 0/5، 0/25، 0/12 گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک، برای ارزیابی شاخص‌های کیفی شامل تغییرات حجم، دانسیته ظاهری، چروکیدگی و مشخصه‌های رنگ استفاده شد.

سینتیک خشک شدن ورقه‌های موز و مدل سازی آن

پس از انجام آزمایش‌های مرتبط با سینتیک خشک‌شدن لایه نازک موز، مدل‌های ریاضی فرایند خشک شدن آنها در خشک‌کن ترکیبی توسعه داده شد. برای این منظور ابتدا منحنی‌های خشک‌شدن ورقه‌های موز به صورت تغییرات نسبت رطوبت در برابر زمان ترسیم شد. نسبت رطوبت، مقدار رطوبت نمونه‌ها را در هر لحظه نسبت به رطوبت اولیه بیان می‌کند که در هر لحظه از معادله 1 محاسبه گردید (Cakmak and Yildiz, 2011). رطوبت اولیه موز 3/48 گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک به‌دست آمد. برای انطباق داده های آزمایشی با مدل‌های مختلف مورد استفاده برای بیان سینتیک خشک شدن محصولات کشاورزی، از مدل‌های موجود در جدول 1 استفاده شد(Doymaz, 2007).

$$MR = \frac{M_t}{M_0} \quad (1)$$

در این رابطه MR نسبت رطوبت (بدون واحد)، M_t رطوبت محصول در هر زمان مورد نظر و M_0 رطوبت اولیه محصول می‌باشد.

MR: نسبت رطوبت، t: زمان خشک شدن، a، b، c، k، K0، K1 و n اعداد یا ثابت‌های مدل‌ها هستند.

جدول 1- مدل‌های ریاضی فرایند خشک شدن لایه نازک میوه‌ها

شماره مدل	نام مدل	معادله مدل
1	نیوتون	$MR = \exp(-k.t)$
2	پیج	$MR = \exp(-k.t^n)$
3	پیج اصلاح شده	$MR = \exp(-k.t)^n$
4	هندرسون و پابلیس	$MR = a.\exp(-k.t)$
5	لگاریتمی	$MR = a.\exp(-k.t) + c$
6	دوجمله‌ای	$MR = a.\exp(-k_0.t) + b.\exp(-k_1.t)$
7	دو جمله‌ای نمائی	$MR = a * \exp(-k.t) + \exp(-n.t)$
8	وانگ سینگ	$MR = 1 + at + bt^2$
9	میدلی و همکاران	$MR = a * \exp(-k.t^n) + b.t$

مدل‌های مذکور در محیط نرم افزار متلب بر روی داده‌های تجربی حاصل از آزمایش‌ها اعمال و ضرایب مدل‌ها استخراج شدند. از شاخص‌های آماری مناسب شامل ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به‌عنوان ملاک‌های ارزیابی میزان انطباق مدل استفاده شد (Doymaz and Pala, 2002). مدلی که بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا و کمترین جملات مدل را داشت به عنوان بهترین مدل انتخاب و سپس مدل‌های به دست آمده در شرایط مختلف آزمایش شامل دماها و ضخامت‌های مختلف با یکدیگر تلفیق شده و ضرایب مدل چندگانه به‌صورت تابعی از متغیرهای مستقل مذکور محاسبه شدند.

تغییرات دانسیته ظاهری

علاوه بر مدل‌سازی فرایند خشک شدن ورقه های نازک موز، مطالعه تغییرات کیفی محصول خشک‌شده هم از اهمیت بالایی برخوردار بود. به‌طوری‌که برای محاسبه دانسیته ظاهری، حجم نمونه‌های موز طی فرآیند شدن در رطوبت‌های مختلف شامل 2، 1، 0/5، 0/25، 0/12 گرم آب به ازای هر گرم ماده خشک اندازه‌گیری شد.

برای این منظور در هر آزمایش و در هر سطح رطوبتی مذکور، چهار ورقه موز به صورت تصادفی از روی سینی دوم برداشته شده و حجم آن‌ها با روش جابجایی تولوئن و با استفاده از پیکنومتر اندازه‌گیری شد. سپس دانسیته ظاهری آنها محاسبه گردید (Yan *et al.*, 2008).

اندازه‌گیری شاخص‌های رنگ

رنگ میوه‌های خشک‌شده یکی از ملاک‌های مهم در ارزیابی خشک‌کن، انتخاب مناسب‌ترین نوع آن، تعیین مشخصه های عملکردی آن و نیز کیفیت محصول نهایی می‌باشد. بنابراین شاخص‌های رنگ میوه‌های خام و نیز رنگ آنها در حین خشک‌شدن ارزیابی شد. برای این منظور در سطوح رطوبتی مختلف شامل 2، 1، 0/5، 0/25، 0/12 گرم آب به ازای هرگرم ماده خشک، چهار ورقه موز به‌صورت تصادفی از خشک‌کن خارج و با استفاده از دستگاه هانترلب از آنها عکس‌برداری شد. در ادامه هر یک از عکس‌ها در محیط نرم‌افزار فتوشاپ فراخوانی شده و شاخص‌های رنگ از قبیل L، a و b که به ترتیب بیان‌گر مقدار شفافیت، قرمزی و سبزی و نهایتاً زردی و آبی بودن نمونه‌ها می‌باشند، قرائت و تفاوت رنگ کل نمونه‌های خشک‌شده با نمونه‌های تازه به

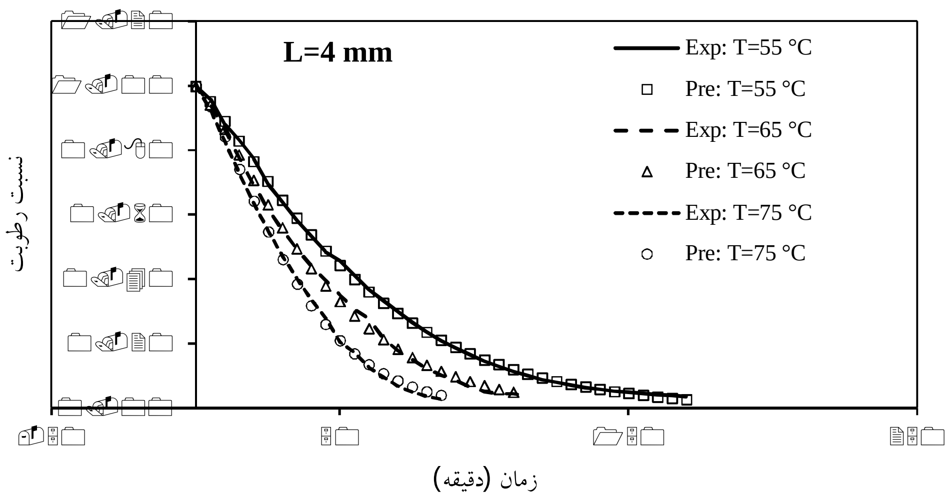
عنوان معیاری برای بیان مقدار تغییرات رنگ کلی (ΔE) در طی خشک کردن، توسط رابطه (2) محاسبه گردید. در این معادلات زیرنویس‌های o و i به‌ترتیب بیانگر مشخصه‌های رنگ موز تازه و خشک شده می‌باشند (Yildiz *et al*., 2001).

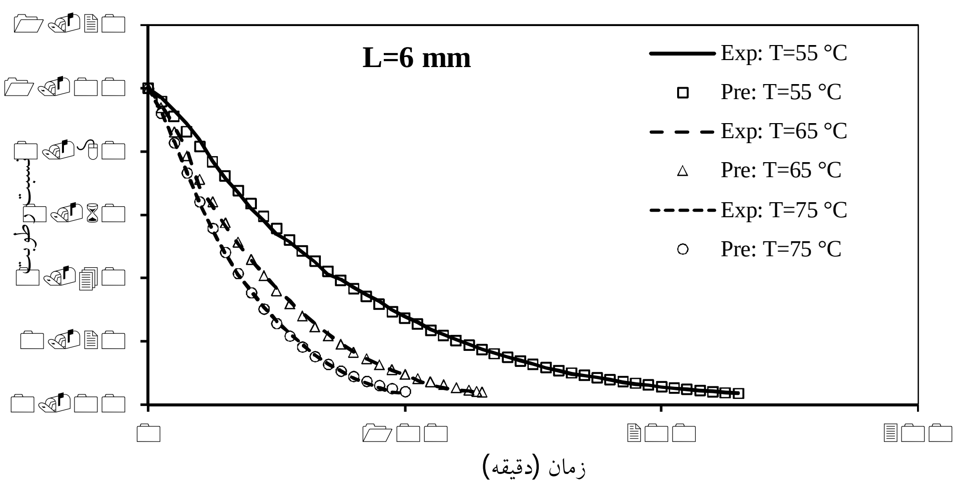
$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_i^*)^2 + (a_0^* - a_i^*)^2 + (b_0^* - b_i^*)^2} \qquad (2)$$

نتایج و بحث

سینتیک خشک‌شدن ورقه‌های موز

فرآیند خشک‌کردن ورقه‌های موز در دما و ضخامت‌های مختلف با استفاده از خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم انجام شد و سینتیک خشک‌شدن آنها به‌صورت تغییرات نسبت رطوبت در مقابل زمان رسم گردید (شکل 2).





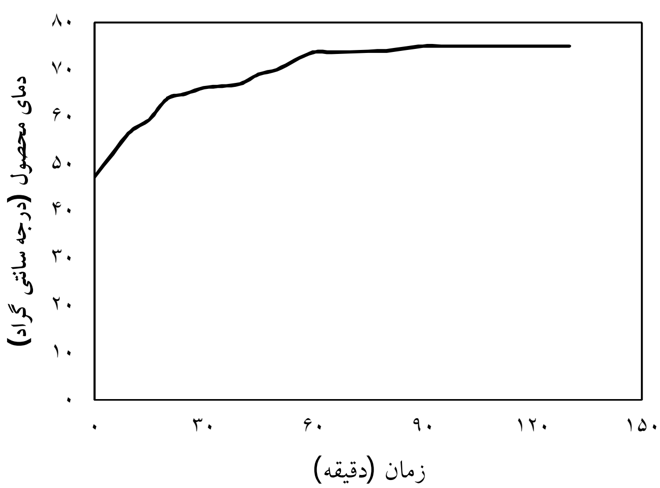
شکل 2- منحنی خشک‌شدن لایه نازک موز در دماهای مختلف سطح محصول و ضخامت‌های مختلف برای داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده توسط مدل پیج

در این نمودارها علامت T دمای سطح محصول و L_1 و L_2 به‌ترتیب ضخامت 4 و 6 میلی‌متر ورقه‌های موز را نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که منحنی‌ها نشان می‌دهند نسبت رطوبت نمونه‌ها (خطوط پیوسته و منقطع در شکل 2) طی فرآیند خشک‌کردن به‌صورت یک تابع نمایی با تغییرات زمان خشک‌شدن کاهش می‌یابد. کمترین زمان خشک‌شدن میوه‌ها مربوط به دمای سطح محصول 75 درجه سانتی‌گراد و ضخامت 4 میلی‌متر می‌باشد و منحنی این تیمار از شیب تندتری نسبت به سایر تیمارها برخوردار است. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهد زمان خشک‌شدن میوه‌ها با افزایش دمای سطح میوه‌ها کاهش می‌یابد. به‌طوری‌که با افزایش دمای سطح محصول از 55 درجه سانتی‌گراد به

75 درجه سانتی‌گراد، زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن نمونه‌های مدور موز در ضخامت‌های 4 و 6 میلی‌متر به‌ترتیب 88/4 و 128/4 دقیقه کاهش یافت. هم‌چنین در یک دمای ثابت، زمان خشک شدن نمونه‌ها با افزایش ضخامت آن‌ها، افزایش یافت. به‌طور میانگین با افزایش ضخامت نمونه‌ها از 4 به 6 میلی‌متر، زمان مورد نیاز برای خشک‌شدن نمونه‌ها در دماهای 55، 65 و 75 درجه سانتی‌گراد به‌ترتیب 60، 16/7 و 20 دقیقه افزایش یافت.

Swasdisevi و همکاران (2009) طی خشک‌کردن ورقه‌های موز به روش ترکیبی FTIR و خلایی تاثیر ضخامت ورقه‌های موز از 2 به 4 میلی‌متر در دمای 50 درجه سانتی‌گراد بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش ضخامت تاثیر معنی‌داری روی زمان خشک شدن دارد. Thuwapanichayanan و همکاران (2011) زمان خشک‌شدن ورقه‌های موز با ضخامت 3 میلی‌متر و با هوای گرم با دمای 70، 80، 90 و 100 درجه سانتی‌گراد را به‌ترتیب 400، 140، 100 و 75 دقیقه گزارش کردندکه بسیار طولانی‌تر از زمان خشک‌شدن ورقه‌های موز به روش ترکیبی مادون قرمز- هوای به‌دست آمده در تحقیق حاضر می‌باشد که این امر موید ارجحیت روش خشک‌کردن ترکیبی می‌باشد. Pekke و همکاران (2013) نیز با مقایسه خشک‌کردن ورقه‌های موز به دو روش هوای گرم و مادون قرمز نشان دادند که خشک‌کردن نمونه‌ها به روش مادون قرمز سریعتر از هوای گرم انجام می‌شود زیرا در این روش نمونه‌ها سریعتر گرم شده و دمای آنها در زمان کمتری به دمای مورد نظر می‌رسد.

شکل 3 تغییرات دمای سطح محصول را در طول خشک‌کردن محصول با دمای 75 درجه سانتی‌گراد بصورت تابعی از زمان خشک شدن نشان می‌دهد. همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود دمای سطح محصول به دلیل تاثیر گرمای نهان تبخیر به‌صورت تدریجی افزایش یافته و پس از 80 دقیقه به دمای 75 درجه سانتی‌گراد رسیده است.



شکل 3- تغییرات دمای سطح محصول تابعی از زمان در طول خشک‌کردن با دمای 75 درجه سانتی‌گراد

مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن

برای مدل‌سازی سینتیک خشک‌شدن موز، مدل‌های ارایه شده در جدول 1 روی داده‌های تجربی برازش شدند و شاخص‌های آماری به‌دست آمده در شرایط مختلف خشک‌کردن در جدول 2 ارایه شد.

همان‌طوری‌که ملاحظه می‌شود بالاترین مقدار R^2 و کمترین مقدار RMSE در مدل پیج به‌دست آمد. بنابراین این مدل به‌عنوان بهترین مدل برای توصیف فرآیند خشک‌کردن موز در خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز- هوای گرم انتخاب شد که ضرایب آن در جدول 3 ارایه شده است. در شکل 2 مقادیر داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل منفرد (مدل رگرسونی چندگانه) نشان داده شده است. هم‌بستگی خوبی بین داده‌های تجربی و پیش‌بینی شده وجود دارد که مدل پیج توانسته است در پیش‌بینی رطوبت محصول تابعی از زمان فرآیند به‌خوبی عمل کند.

مدل منفرد توسعه داده شده از ترکیب مدل‌های جدول 3 در شرایط مختلف آزمایش شامل دماها و ضخامت‌های متفاوت نمونه موز حاصل شده و توسط رابطه 4 نشان داده شده است که در آن L ضخامت ورقه‌های موز بر حسب متر و T دمای سطح محصول بر حسب کلوین می‌باشد. این مدل می‌تواند در ضخامت‌های مختلف نمونه در محدوده 4 تا 6 میلی‌متر و در دماهای مورد استفاده منابع مادون‌قرمز (در محدوده 55 تا 75 درجه سانتی‌گراد) نسبت به پیش‌بینی میزان رطوبت محصول در حین فرآیند خشک‌کردن ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد.

$$MR = \exp[(-0.02008 + 7.07 \times 10^{-5} \times T + 0.869 \times L)^{(0.850089+0.00185\times T-47.3333\times L)}] \quad (4)$$

جدول 2- میانگین شاخص‌های آماری حاصل از برازش منحنی‌های خشک‌کردن ورقه‌های موز در تیمارهای مختلف

مدل	RMSE	R^2
نیوتون	0/036346	0/997357
پیج	0/009163	0/999523
پیج اصلاح شده	0/036346	0/997357
هندرسون و پابلیس	0/096392	0/995118
لگاریتمی	0/013999	0/998904
دوجمله‌ای	0/013382	0/998696
دو جمله‌ای نمائی	0/028026	0/995904
وانگ سینگ	0/013842	0/998908
میدلی	0/013121	0/998568

جدول 3- مقادیر ثابت و ضرایب مدل پیج در دما و ضخامت‌های مختلف

دما (°C)	ضخامت(mm)	K	n	R^2
55	4	0/006972	1/217	0/9995
65	6	0/006598	1/147	0/9992
75	4	0/007735	1/269	0/9982
55	6	0/009244	1/203	0/9999
65	4	0/007231	1/373	0/9984
75	6	0/01131	1/225	0/9997

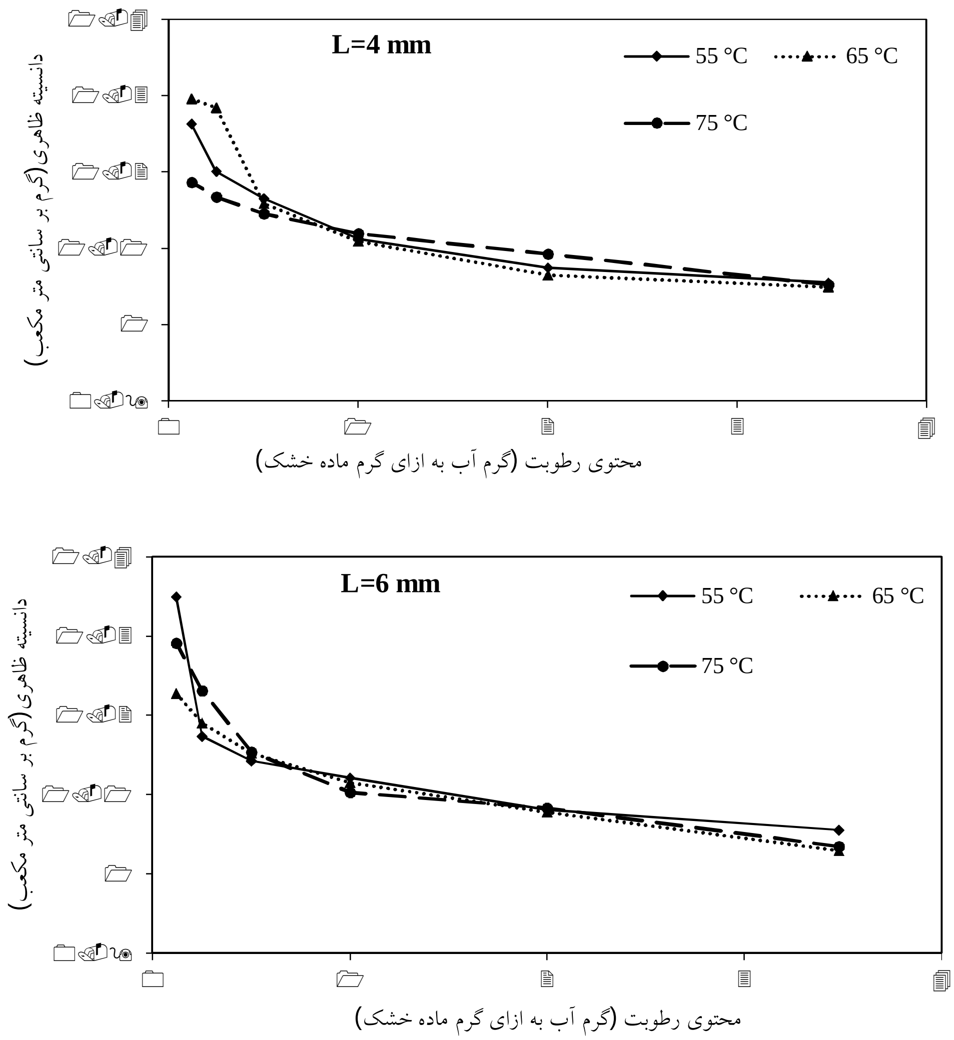
بررسی دانسیته ظاهری نمونه‌های موز خشک شده

شکل 4 تغییرات دانسیته ظاهری نمونه‌های موز را به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت خشک پایه در طی فرآیند خشک‌شدن نشان می‌دهد. با کاهش محتوی رطوبت، دانسیته ظاهری در تیمارهای مختلف افزایش می‌یابد. علت افزایش دانسیته ظاهری، کاهش بیشتر حجم موز در مقایسه با مقدار آب خارج شده از داخل ماده غذایی در بازه زمانی مورد نظر است. نتایج تجزیه واریانس نشان داد که فاکتورهای دمای سطح محصول و ضخامت ورقه‌های موز اثر معنی‌داری بر روی تغییرات دانسیته ظاهری ندارند (جدول 4). با این حال بیشترین و کم‌ترین مقدار دانسیته ظاهری موز خشک‌شده به‌ترتیب مربوط به دمای 55 درجه سانتی‌گراد و ضخامت 6 میلی‌متر و دمای 75 و ضخامت 4 میلی‌متر می‌باشد. چندین محقق از قبیل Talla و همکاران (2004)، Fernandez و همکاران (2008)، Koc و همکاران (2008)، Ortuno و همکاران (2010) و قربانی و همکاران (1392) نیز به نتایج مشابهی دست یافتند به‌طوری‌که در محصولاتی مانند موز، آناناس و به و پرتقال و آلو تحرک ماتریکس جامد در حین خشک‌شدن و به تبع آن چروکیدگی محصول در مقابل میزان تغییرات رطوبت طوری است که در پایان فرآیند موجب افزایش دانسیته محصول می‌گردد که مشابه نتیجه تحقیقات حاظر است. این درحالی است که در بعضی از محصولات مانند سیب و سیب‌زمینی، مقدار حجم کاهش یافته در مقایسه با حجم آب تبخیر شده در طول فرآیند خشک‌کردن کمتر و به تبع آن دانسیته محصول نسبت به وضعیت اولیه، کاهش می‌یابد.

جدول 4- نتایج تجزیه واریانس اثر دمای سطح محصول و ضخامت نمونه‌ها بر روی دانسیته ظاهری نمونه‌های موز خشک شده

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات
دمای سطح محصول	2	0/007051 ns
ضخامت	1	0/007459 ns
اثر متقابل دمای سطح محصول و ضخامت	2	0/013578 ns
بلوک	2	0/000663 ns
خطا	10	0/015372

ns نشان‌دهنده عدم معنی‌دار بودن می‌باشد



شکل 4- تغییرات دانسیته ظاهری نمونه‌های موز را به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت خشک پایه

تغییرات شاخص‌های رنگ در حین خشک شدن
شاخص‌های شفافیت، قرمزی و زردی

نتایج مطالعه شاخص‌های رنگ نمونه‌های موز نشان می‌دهد که با پیشرفت خشک‌کردن و کاهش رطوبت محصول، مقادیر شاخص‌های شفافیت (L) و زردی (b) به‌صورت تابعی از محتوی رطوبت ماده کاهش می‌یابند. ولی شاخص قرمزی (a) در طول فرآیند افزایش یافته و بر میزان شدت قرمزی ماده افزوده می‌شود. به طورکلی در طول خشک کردن رنگ محصول تیره‌تر می‌شود که به دلیل تغییر در رنگ دانه‌ها، واکنش قهوه‌ای شدن غیرآنزیمی (میلارد) و کاراملیزاسیون می‌باشد. همان‌طوری‌که نتایج تجزیه واریانس نشان می‌دهد دمای سطح محصول و ضخامت نمونه‌ها اثر معنی‌داری در سطح احتمال 1 درصد روی شاخص‌های رنگ مذکور دارند (جدول 5).

نتایج مقایسه میانگین اثر دمای سطح محصول بر روی شاخص‌های رنگ از قبیل شفافیت، زردی و قرمزی در جدول 6 ارایه شده است. بر اساس نتایج با افزایش دمای سطح محصول از شفافیت میوه‌ها کاسته شده و بر میزان قرمزی آنها افزوده شده است. همچنین با افزایش ضخامت نمونه‌ها نیز رنگ میوه‌ها کدرتر شده است که دلیل آن طولانی بودن زمان خشک‌شدن و تاثیر حرارت بر رنگ دانه‌ها در طول زمان‌های بالای خشک شدن می‌باشد (جدول 7).

جدول 5- نتایج تجزیه واریانس اثر دمای سطح محصول و ضخامت نمونه‌ها بر روی شاخص‌های رنگ موز خشک شده

منابع تغییر	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		L	a	b	ΔE
دمای سطح محصول	2	128/782**	2/00914**	7/2625**	120/917**
ضخامت	1	29/219**	1/20988**	25/7602**	48/23**
اثرات متقابل دمای سطح محصول و ضخامت	2	0/159ns	0/00765ns	1/4165*	0/857ns
بلوک	2	0/661	0/00617	0/1610	0/412
اشتباه	10	0/387	0/02632	0/3370	0/238

** و * به ترتیب نشان‌دهنده معنی‌دار بودن در سطح احتمال 1 و 5 درصد است.

ns نشان دهنده عدم معنی‌دار بودن می‌باشد.

جدول 6- مقایسه میانگین اثر دمای سطح محصول روی شاخص های رنگ

دمای سطح محصول (°C)	شفافیت نهایی (L)	قرمزی a	زردی b	ΔE
55	94/25A	4/41A	19/25 A	28/99A
65	18/83B	5/33B	18/35 B	35/59B
75	17/24C	5/47B	17 C	37/57C

حروف متفاوت نشان دهنده وجود تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال 5 درصد می‌باشد.

جدول 7- مقادیر شاخص‌های رنگ در ضخامت‌های مختلف ورقه‌های موز

ضخامت	L	a	b	ΔE
4	21/94	4/81	19/42	33/41
6	19/39	5/33	17/02	35/69

تغییرات کلی رنگ نمونه‌ها

تغییرات کلی رنگ اولیه اسلایس‌های موز نسبت به انتهای فرآیند خشک کردن، تابع میزان تغییرات توام شاخص‌های رنگی L، a و b است به‌طوری‌که هرچقدر تغییرات این شاخص‌ها در طول فرآیند خشک‌کردن بیشتر باشد مقدار تغییر رنگ کلی نیز افزایش می‌یابد که بزرگی داده‌ها نشانگر کاهش کیفیت و میزان صدمات در طول فرآیند خشک کردن می‌باشد. به وضوح می‌توان اظهار نمود استفاده از شاخص تغییر رنگ کلی (ΔE) برای بیان تغییرات کیفی (رنگ) بهتر از استفاده منفرد از مقادیر a، b و L می‌باشد. بر مبنای نتایج حاصل از تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها (جدول 5 و 6)، با افزایش دما تغییرات کلی رنگ افزایش یافته است. ضخامت نیز تأثیر مشابهی داشته و افزایش آن موجب افزایش رنگ کلی نمونه‌ها از 33/41 به 35/69 گردید.

Thuwapanichayanan و همکاران (2011) بیان داشتند که طی فرآیند خشک‌کردن همرفتی ورقه‌های موز، افزایش دمای هوای گرم از 70 به 90 درجه سانتی‌گراد تاثیر معنی‌داری در شاخص‌های رنگ نمونه‌ها نداشت ولی افزایش بیشتر دما از 90 به 100 درجه سانتی‌گراد منجر به قهوه‌ای‌تر شدن ورقه‌های موز گردید. Baini و Langrish (2009) نیز گزارش کردند که افزایش دمای هوا از 50 به 80 درجه سانتی‌گراد تاثیر محسوسی روی آهنگ قهوه‌ای شدن ورقه‌های موز نداشت. ولی افزایش دمای هوا به 100 درجه سانتی‌گراد روی شاخص‌های رنگ تاثیرگذار بود. Pekke و همکاران (2013) طی خشک‌کردن ورقه‌های موز به دو روش هوای گرم و مادون قرمز گزارش کردند که تغییر رنگ نمونه‌های موز در خشک‌کردن به روش مادون قرمز بیشتر از خشک‌کردن با هوای گرم است. به‌طوری‌که در ضخامت 5 میلی‌متر، شاخص تغییرات رنگ کلی ورقه‌های موز با افزایش دمای هوای گرم از 60 به 80 درجه سانتی‌گراد از 21 به 26 افزایش یافت ولی میزان افزایش آن در خشک‌کردن به روش مادون قرمز و در دمای یکسان از 25 به 37 بود. به عبارت دیگر می‌توان عنوان نمود که در موقع استفاده از خشک کن مادون قرمز و ترکیبی، مقادیر تغییر رنگ کلی در محدوده 30 تا 40 قرار می گیرد و دلیلی اصلی آن افزایش جذب امواج مادون قرمز در لایه سطحی محصول و به تبع آن افزایش دمای سطحی محصول و بروز تغییر در ساختار رنگ دانه‌ها و نهایتا تغییر رنگ کلی می‌باشد.

به‌طورکلی برای جلوگیری از تغییرات رنگ محصول در حین فرآیند خشک‌کردن استفاده از دمای سطح محصول 55 درجه سانتی‌گراد و

ضخامت 4 میلی‌متر ورقه‌های موز ارجح تر می باشند. این در حالیست که در این تیمار، زمان خشک‌شدن ورقه‌های موز طولانی‌تر می باشد. با این وجود برای حفظ کیفیت مطلوب میوه‌های خشک شده به‌خصوص حفظ رنگ آنها، لازم است از دمای سطح محصول پایین استفاده شود زیرا رنگ محصول اولین شاخص در مشتری‌پسندی محصول بوده و مصرف‌کننده‌ها بیشتر به شفافیت و رنگ محصول اهمیت می‌دهند. برای جبران طولانی‌شدن زمان خشک‌شدن و نیز برای جلوگیری از مصرف انرژی بیشتر، استفاده از ضخامت‌های کمتر اسلایس‌ها (کمتر از 4 میلی‌متر) توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق خشک‌کن ترکیبی مادون قرمز– هوای‌گرم توسعه داده شد و برای آزمون و ارزیابی آن، سینتیک خشک‌شدن لایه نازک موز با استفاده از خشک‌کن مذکور مورد بررسی قرار گرفت. چنانکه انتظار می‌رفت خشک‌کن ترکیبی از نظر کاهش زمان خشک‌شدن و افزایش کیفیت محصول نهایی از دیدگاه کاهش چروکیدگی و دانسیته ظاهری، نسبت به روش همرفتی منفرد جذاب‌تر می‌باشد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد زمان فرآیند خشک‌کردن لایه نازک موز تحت تأثیر حداکثر دمای سطح محصول تابعی از دمای منبع مادون قرمز و هوای گرم و ضخامت نمونه‌ها قرار دارد. به‌طوری‌که زمان فرآیند نسبت به روش‌های همرفتی هوای گرم کوتاهتر می‌باشد. هم‌چنین استفاده از دماهای مختلف مادون قرمز تاثیر معنی‌داری روی چروکیدگی نهایی نمونه‌ها ندارد ولی شرایط مختلف خشک‌کردن روی کیفیت ظاهری نمونه‌های موز معنی‌دار بود و با افزایش دمای منبع مادون قرمز و هوای گرم مقدار تغییر رنگ کلی افزایش می‌یابد که یک نکته منفی از دیدگاه مصرف‌کننده نهایی است. مدل پیج بهترین مدل جهت توصیف رفتار خشک‌شدن ترکیبی مادون‌قرمز– هوای گرم ورقه‌های موز، با بیشترین مقدار R^2 و حداقل مقدار RMSE می‌باشد.

منابع

امیرنجات، ح.، 1389، ارزیابی اثرات توأم روش‌های جابه‌جایی حرارت و تابش اشعه مادون‌قرمز بر خشک‌کردن لایه نازک قارچ خوراکی، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.

موسوی بایگی، ف.، فرهمند، ع.، تقی‌زاده، م. و ضیا فروغی،ا.، 1395، مدل سازی خشک‌کردن لایه نازک خرمالو به دو روش هوای داغ و مادون‌قرمز، فصلنامه علوم و صنایع غذایی، دوره 13، شماره 53، 161-171.

بداقی، ا.، 1392، طراحی و ساخت خشک‌کن آزمایشگاهی ترکیبی مادون‌قرمز هوای گرم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.

زیرجانی، ل. و توکلی پور،ح.، 1389، مطالعه امکان تولید برگه موز توسط روش خشک‌کردن ترکیبی هوای گرم و ماکروویو، نشریه پژوهش‌های علوم و صنایع غذایی ایران. جلد 66، شماره 1، 73-86.

حسینی‌قابوس، س.، سیدین‌اردبیلی، م.، کاشانی‌نژاد، م.، اسدی، غ. و اعلمی، م.، 1395، سینتیک انتقال جرم خشک‌کردن ترکیبی مادون‌قرمز- هوای داغ کدو حلوایی، علوم غذایی و تغذیه، دوره13، شماره 4، 5-16.

قربانی، ر.، دهقان‌نیا، ج.، سیدلو هریس، س. و قنبرزاده، ق.، 1392، مدل سازی دانسیته ظاهری در طی خشک کردن آلوی پیش تیمار شده با اولتراسوند وآبگیری اسمزی. فصلنامه علوم و فناوری‌های نوین غذایی، دوره 1، شماره 2، 23-38.

کریمی، ف.، 1390، مدل‌سازی سینتیک خشک‌کردن ورقه‌های موز، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه علوم و صنایع غذایی. دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز.

AOAC, 1990, Official Method of Analysis, Association of Official Analytical Chemists (No.934.06).

Baini, R., & Langrish, T. A. G., 2009, Assessment of colour development in dried bananas measurements and implications for modelling. *Journal of Food Engineering*, 93,177-182.

Cakmak, G. & Yildiz, C., 2011, the drying kinetics of seeded grape in solar dryer with PCM-based solar integrated collector. *Food and Bioproducts Processing*, 89, 103-108.

Doymaz, I. & Pala, M., 2002, the effect of dipping pretreatment on air-drying rates of the seedless grapes. *Journal of Food Engineering*, 52: 413-417.

Doymaz, I., 2007, the kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 243–248.

Fernandez, F. A.N., Linhares J.F.E. & Rodrigues, S., 2008, Ultrasound as pre-treatment for drying of pineapple. Ultrasonics Son chemistry, 15, 1049-1054.

Hakan, O.M. & Can, E., 2006, Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. *Journal of Food Engineering*, 77, 119–125.

Hebbar, U.H., Vishwanatham, K.H. & Ramesh, M.N., 2004, combined infrared and hot air dryer for vegetables. *Journal*

of Food Engineering, 65, 557-563.

Khampakool, A., Soisungwan, S., & Sung S.H, 2019. Potential application of infrared assisted freeze drying (IRAFD) for banana snacks: Drying kinetics, energy consumption, and texture. *LWT - Food Science and Technology*, 99, 355–363.

Koc, B., Eren, I. & Ertekin, F. K., 2008, Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *Journal of Food Engineering*, 85, 340-349.

Ortuno, C., Pérez-Munuera, I., Puig, A. & Riera, E., 2010, Influence of power ultrasound application on mass transport microstructure of orange peel during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 3, 153-159.

Pan, Z. & Atungulu, G. G., 2011, Infrared heating for food and agricultural processing. *Taylor & Francis Group*, 5, 353-360.

Pekke, M.A., Pan, Z., Atungulu, G.G., Gary Smith, G., & Thompson, J.F., 2013, Drying characteristics and quality of bananas under infrared radiation heating. *International Journal of Agricultural and Biology Engineering*, 6 (3), 58-70.

Sharma, G. P., Verma, R. C. & Pathare, P. B., 2005, Thin-layer infrared radiation drying of onion slice. *Journal of Food Engineering*, 67, 361-366.

Swasdisevi, T., Devahastin, S., Sa-Adchom, P. & Soponronnarit, S., 2009. Mathematical modeling of combined far-infrared and vacuum drying banana slice. *Journal of Food Engineering*, 92, 100–106.

Talla, A., Puiggali, J.-R., Jomaa, W. & Jannot, Y., 2004, Shrinkage and density evolution during drying of tropical fruits: application to banana. *Journal of Food Engineering*, 64, 103-109.

Thuwapanichayanan, R., Prachayawarakorn, S., Jaruwan Kunwisawa, J., & Soponronnarit, S., 2011, Determination of effective moisture diffusivity and assessment of quality attributes of banana slices during drying. *LWT - Food Science and Technology*, 44, 1502-1510.

Yaldiz, O., Ertekin, C. & Uzun, H. I., 2001, Mathematical modeling of thin layer drying of sultana grapes. *Energy*, 26, 457-465.

Yan, Z., Sousa-Gallagher, M.J. & Oliveira, F.A.R., 2008, Shrinkage and porosity of banana, pineapple and mango slices during air-drying. *Journal of Food Engineering*, 84, 430–4.

Iranian Food Science and Technology Research Journal
Vol. 15, No. 5, Dec- Jan 2020, p. 623-634

نشریه پژوهشهای علوم و صنایع غذایی ایران
جلد 15، شماره 5، آذر - دی 1398، ص. 634-623

Development, assessment and evaluation of a combined infrared and hot-air dryer to determine its performance characteristics during banana slice drying

P. Ahmadi Gheshlagh[1], S. S. Seiiedlou[2*], H. Nalbandi[3]

Received: 2018.10.30
Accepted: 2019.05.08

Introduction: Thin layer drying of agricultural products using an infrared dryer (IR) is one of the interesting and low cost methods of dehydration. Quality of dried products could be increased if the engineering aspects and proper selection of performance parameters be well considered in the designing of a dryer. The dryer that uses two or more drying methods in combination, produces in the most cases the higher quality product with lower energy consumption.

Materials and methods: In this study, an available IR dryer was modified and a combined IR and hot- air dryer was constructed. According to the reported quality factors in the literatures and market desire, the developed dryer performance was evaluated during the drying of banana slices. The studied factors were the effects of the thickness of slices (4 and 6 mm) and the surface temperature of the product (55, 65 and 75 °C) on the drying kinetic and quality of the dried product. Some various mathematical models were fitted to the experimental data and results and among them the best fitted model was selected.

Results & discussion: Based on the results, the different surface temperature and thickness of the slices had a significant effect on the drying time and color changes of the samples. However, they did not affect the density of samples. Drying time of the banana slices (to reach the moisture ratio of 0.04) with the thickness of 4 mm was 155, 105 and 80 min at the surface temperatures of 55, 65 and 75 °C, respectively. At the thickness of 6 mm, the drying time was 230, 130 and 100 min, respectively at the mentioned temperature. The minimum color change were observed at the thickness of 4 mm (ΔE=32.41) and surface temperature of 55°C (ΔE= 28.99). The samples dried at the temperature of 55 °C had the best quality. Evaluation of the various mathematical models indicated that the Page model is the most suitable to predict the drying kinetic of banana slices under the studied condition. Comparing the obtained results with the reported ones for just hot-air or IR drying of banana slices; it is obvious that in point of product quality and drying time, the combined IR and hot- air dryer has better conditions.

Key words: Mathematical Model, Banana, Combined IR and Hot-Air Dryer, Qualitative Properties

1. MSc student, Technical and Vocational University Beheshti of Urmia.
2 and 3. Associate Professor and Assistant Professor, Department of agricultural mechanization engineering, University of Tabriz.
*(Corresponding author: email: ss_seiedlo@yahoo.com)